

## KAJIAN PERUBAHAN UKURAN RONGGA ZEOLIT RHO BERDASARKAN VARIASI RASIO Si/Al DAN VARIASI KATION ALKALI MENGGUNAKAN METODE MEKANIKA MOLEKULER

### STUDY OF SIZE CHANGES ZEOLITE RHO PORE BASED ON THE EFFECT OF Si/Al RATIO VARIATION AND ALKALINE CATIONS VARIATION USING MOLECULAR MECHANICS METHOD

Wahdana Kusuma Sari<sup>1\*</sup>, Rahmat Gunawan<sup>1</sup>, Erwin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Jurusan Kimia, FMIPA, Universitas Mulawarman, Samarinda

\* Corresponding Author : wahdana\_nanana@gmail.com

#### ABSTRACT

*The structure modeling of zeolite RHO with variation of Si/Al ratio (5; 4.33; 3.8; 3.36; 3; 2.69; 2.43; 2.2; 2) and variation of alkaline cations ( $\text{Li}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Rb}^+$ ,  $\text{Cs}^+$ ,  $\text{Fr}^+$ ) calculated by the molecular mechanics method has been investigated. The result shows that the structure of zeolite RHO with Si/Al ratio 3.36 has the most stable structure with a minimum energy 2652.0308 kcal/mol. The most stable structures of zeolite RHO impregnated with cation is that impregnated with  $\text{Fr}^+$  (alkaline) with a minimum energy 3006.6587 kcal/mol. The result shows that the zeolite RHO structure with cations  $\text{Fr}^+$  (alkaline) has the largest pore diameter which potentially has the best adsorption capacity.*

**Keywords:** Zeolite RHO, Molecular Mechanics Method, Alkaline, Pore Diameters.

#### PENDAHULUAN

Bidang ilmu kimia juga dipengaruhi oleh perkembangan komputer yang memunculkan bidang ilmu kimia komputasi. Kimia komputasi merupakan eksperimen kimia yang dilakukan dengan menggunakan komputer dimana menggabungkan antara unsur eksperimen dan teori dalam suatu sistem kimia [1].

Pemodelan molekul merupakan salah satu bagian kimia komputasi tentang struktur molekul yang mempelajari struktur, propertis dan kelakuan suatu molekul dalam sistem molekuler. Pemodelan molekul dapat digunakan untuk merancang suatu molekul sebelum dibuat di laboratorium sehingga dapat diperoleh molekul yang diinginkan secara lebih efisien. Contohnya pemodelan molekul zeolit untuk merancang strukturnya sebelum dilakukan sintesis zeolit yang diinginkan secara langsung di laboratorium [2].

Zeolit didefinisikan sebagai kristal alumino silikat yang mempunyai struktur kerangka tiga dimensi, terbentuk dari struktur tetrahedral  $[\text{AlO}_4]^{5-}$  dan  $[\text{SiO}_4]^{4-}$  yang saling berikatan dengan pori-pori didalamnya terisi ion-ion logam. Ion-ion logam yang mengisi pori zeolit biasanya berupa logam alkali atau alkali tanah dan molekul air yang dapat bergerak bebas [3]. Salah satu contoh zeolit sintesis adalah zeolit RHO yang memiliki beberapa fungsi, diantaranya sebagai katalis dan adsorben.

Penelitian pada bidang yang berhubungan dengan zeolit membutuhkan biaya yang tidak sedikit. Sehingga digunakan alternatif untuk menghemat biaya, yakni dengan perhitungan dan program komputer yang dapat meramalkan hasil yang akan diperoleh, dimana sebagai acuan atau referensi dalam penelitian di laboratorium.

Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui perubahan ukuran rongga dari zeolit RHO terhadap pengaruh variasi rasio Si/Al dan variasi kation golongan alkali ( $\text{Li}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Rb}^+$ ,  $\text{Cs}^+$ ,  $\text{Fr}^+$ ) metode mekanika molekuler. Metode ini dapat membantu untuk melakukan pemodelan dan perhitungan pada zeolit RHO yang dapat menunjukkan perubahan ukuran diameter rongga dan energi molekul.

#### METODOLOGI PENELITIAN

##### Teknik Perhitungan Komputasi

Piranti Lunak yang digunakan adalah perangkat lunak Hyperchem 07. Molekul dan kation yang diteliti adalah Zeolit RHO dan alkali ( $\text{Li}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Rb}^+$ ,  $\text{Cs}^+$ ,  $\text{Fr}^+$ ).

##### Pemodelan Struktur Zeolit RHO

Struktur zeolit dibuat dengan menggambar struktur molekul zeolit RHO yang terdiri dari beberapa struktur tetrahedral  $\text{TO}_4$  dimana T sebagai atom Si dan O sebagai penghubung, hingga membentuk satu sangkar  $\alpha$ . Pemodelan struktur satu unit zeolit RHO dilakukan hingga

diperoleh satu pori besar (*cavity/supercage*) dengan 8 sangkar  $\alpha$  yang saling terhubung. Pemodelan struktur zeolit RHO dilakukan tanpa atom Al, tanpa  $H_2O$  dan tanpa kation. Setelah selesai menggambar struktur zeolit RHO dilakukan *Model Build* yang dilanjutkan dengan melakukan *start log*, kemudian ditulis nama file .log yang akan disimpan. Selanjutnya dilakukan optimasi geometri menggunakan metode mekanika molekular dengan medan gaya MM+. Setelah optimasi selesai dilakukan maka selanjutnya dilakukan *stop log* dan file disimpan dalam bentuk .hin. Kemudian dilakukan pengukuran diameter rongga, panjang ikatan Si-O dan sudut Si-O-Si.

### Pemodelan Struktur Zeolit RHO dengan Variasi Rasio Si/Al

Buka file awal permodelan struktur zeolit RHO yang telah disimpan dalam bentuk .hin. Selanjutnya dilakukan variasi rasio Si/Al dengan mensubstitusi atom Si yang ada menggunakan atom Al. Setelah selesai melakukan substitusi pada atom Si, maka dilakukan *Model Build* pada struktur zeolit RHO yang dilanjutkan dengan *start log* dan ditulis nama file.log yang akan disimpan. Kemudian dilakukan optimasi geometri menggunakan metode mekanika molekular dengan medan gaya MM+. Setelah optimasi geometri selesai dilakukan *stop log*, lalu file disimpan dalam bentuk .hin. Kemudian dilakukan pengukuran diameter rongga, panjang ikatan Si-O dan Al-O, serta sudut Si-O-Al Variasi rasio Si/Al dilakukan adalah rasio 2 hingga 5 dan pengukuran dilakukan pada setiap variasi rasio Si/Al yang dilakukan.

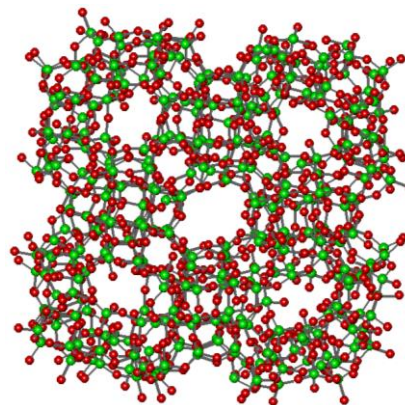
### Pemodelan Struktur Zeolit RHO dengan Variasi Kation

Awalnya dibuka terlebih dahulu file struktur molekul zeolit RHO yang telah dibuat dengan perbandingan ratio Si/Al yang memiliki energi terendah. Selanjutnya dilakukan penambahan kation alkali ( $Li^+$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Rb^+$ ,  $Cs^+$ ,  $Fr^+$ ) dengan menyisipkannya diantara rongga pori dari zeolit RHO. Selanjutnya dilakukan *Model Build* yang dilanjutkan dengan *start log* dan ditulis nama file .log yang akan disimpan. Kemudian dilakukan optimasi geometri menggunakan metode mekanika molekular dengan medan gaya MM+. Setelah optimasi selesai, dilakukan *stop log* dan file disimpan dalam bentuk .hin. Kemudian dilakukan pengukuran diameter rongga, panjang ikatan Si-O dan Al-O, sudut Si-O-Al dan jarak kation-Al.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Hasil Pemodelan Struktur Zeolit RHO

Struktur zeolit RHO yang dihasilkan terdiri dari 1248 atom, di mana terdapat 384 atom Si dan 864 atom O dengan energi minimum sebesar 1845,1579 Kkal/mol.



**Gambar 1** Pemodelan Stuktur Zeolit RHO  
Keterangan: ● : Silika ● : Oksigen

**Tabel 1** Diameter Rongga Struktur Zeolit RHO

No Atom O	$d_A$ (Å)
282-598	10,9547
11-339	9,6845
121-445	8,5717
163-483	9,3468
759-1067	11,5077
649-961	12,5494
912-1212	12,6315
323-635	12,8330

Hasil pengukuran diameter rongga yang diperoleh menunjukkan besar diameter rongga yang beragam atau bervariasi. Hal ini disebabkan karena zeolit RHO merupakan zeolit dengan silika sedang dan mempunyai permukaan yang heterogen. Selain itu juga disebabkan karena adanya interaksi yang berbeda-beda antara setiap atom Si dan atom O pada struktur tersebut [4].

**Tabel 2** Panjang Ikatan Si-O dan sudut Si-O-Si Struktur Zeolit RHO

No Atom	$d_A$
Si-O (1068-1067)	1,6405 Å
Si-O (1066-1067)	1,6568 Å
Si-O-Si (1068-1067-1066)	133,0320°

Ukuran sudut dipengaruhi oleh adanya atom oksigen disekitar sudut tersebut. Jika terdapat atom oksigen yang dekat dengan sudut yang diukur, maka terjadi tolak menolak antara atom

oksigen pada pada sudut yang diukur dengan atom oksigen di dekatnya. Hal ini menyebabkan sudut tersebut menyempit atau menyiku. Berbeda dengan sudut yang tidak terdapat atom oksigen yang dekat dengan sudut yang diukur, maka sudut tersebut cenderung lebih melebar.

### Hasil Pemodelan Struktur Zeolit RHO dengan Variasi Rasio Si/Al

Zeolit RHO termasuk jenis zeolit silika sedang di mana zeolit silika sedang ini memiliki rasio Si/Al sebesar 2 sampai dengan 5 [5]. Sehingga dilakukan variasi rasio Si/Al pada struktur zeolit RHO dengan rasio 2 sampai dengan 5. Variasi rasio pada struktur zeolit RHO dilakukan dengan mensubstitusi atom Si dengan atom Al pada struktur dengan jumlah tertentu, sesuai rasio yang akan digunakan.

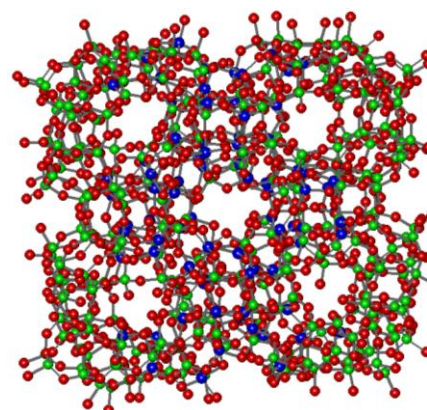
**Tabel 3** Jumlah Atom Si, Al dan O Pada Struktur Zeolit RHO Dengan Variasi Rasio Si/Al

Rasio Si/Al	1 sangkar			8 sangkar		
	Si	Al	O	Si	Al	O
5	40	8	120	320	64	864
4,33	39	9	120	312	72	864
3,8	38	10	120	304	80	864
3,36	37	11	120	296	88	864
3	36	12	120	288	96	864
2,69	35	13	120	280	104	864
2,43	34	14	120	272	112	864
2,2	33	15	120	264	120	864
2	32	16	120	256	128	864

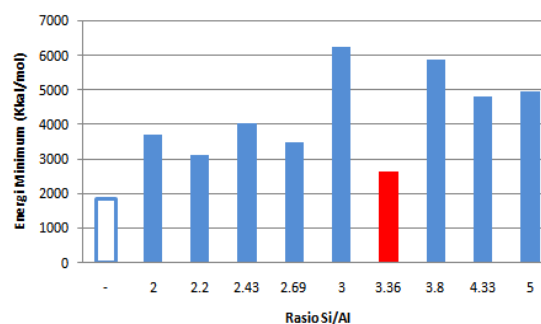
Tabel di atas juga menunjukkan bahwa rasio Si/Al berbanding lurus dengan jumlah atom Si dalam suatu struktur zeolit RHO. Sedangkan rasio Si/Al berbanding terbalik dengan jumlah atom Al dalam struktur zeolit. Semakin besar jumlah atom Al dalam struktur zeolit, maka semakin kecil rasio Si/Al.

**Tabel 4** Energi Minimum Dan Selisih Energi Minimum Struktur Zeolit RHO Dengan Variasi Rasio Si/Al

Rumus Struktur	Rasio Si/Al	Energi Minimum (Kkal/mol)	Selisih Energi Minimum (Kkal/mol)
$\text{Si}_{384}\text{O}_{864}$	-	1845,1579	-
$\text{Al}_{64}\text{Si}_{320}\text{O}_{864}$	5	4944,6572	3099,4993
$\text{Al}_{72}\text{Si}_{312}\text{O}_{864}$	4,33	4803,9580	2958,8001
$\text{Al}_{80}\text{Si}_{304}\text{O}_{864}$	3,8	5857,2456	4012,0877
$\text{Al}_{88}\text{Si}_{296}\text{O}_{864}$	3,36	2652,0308	806,8728
$\text{Al}_{96}\text{Si}_{288}\text{O}_{864}$	3	6226,5703	4381,4124
$\text{Al}_{104}\text{Si}_{280}\text{O}_{864}$	2,69	3464,3154	1619,1575
$\text{Al}_{112}\text{Si}_{272}\text{O}_{864}$	2,43	4047,0642	2201,9063
$\text{Al}_{120}\text{Si}_{264}\text{O}_{864}$	2,2	3128,4006	1283,2427
$\text{Al}_{128}\text{Si}_{256}\text{O}_{864}$	2	3712,7366	1867,5786



**Gambar 2** Struktur Zeolit RHO Rasio Si/Al = 3,36  
Keterangan: ● : Silika ● : Oksigen ● : Aluminium



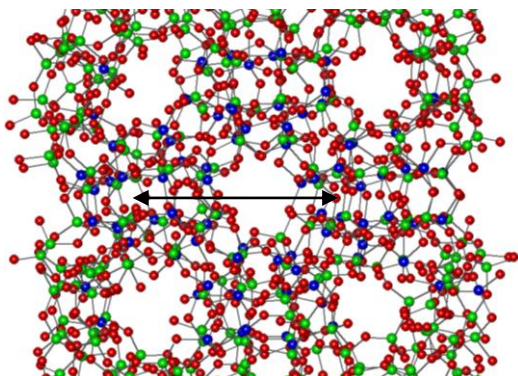
**Gambar 3** Histogram Energi Minimum Struktur Zeolit RHO dengan Variasi Rasio Si/Al

Histogram di atas menunjukkan energi minimum terendah berada pada rasio 3,36 (berwarna merah) dan merupakan struktur yang paling stabil. Energi minimum dipengaruhi oleh struktur molekul di mana perhitungan pada struktur molekul terbaik memiliki energi minimum terendah. Perubahan energi minimum pada variasi rasio Si/Al tidak stabil atau naik turun pada setiap peningkatan rasio. Peningkatan dan penurunan energi diperkirakan karena faktor kesimetrisan dari struktur zeolit akibat adanya pergantian sejumlah atom Si dengan sejumlah atom Al. Semakin simetris suatu struktur maka struktur tersebut akan memiliki kestabilan yang lebih tinggi, sehingga memiliki energi minimum yang lebih rendah [2].

Energi minimum pada struktur zeolit RHO mengalami peningkatan dengan adanya variasi rasio Si/Al yang dilakukan pada struktur. Peningkatan ini terjadi karena atom Si memiliki nomor atom dan massa atom yang lebih besar dibandingkan dengan atom Al. Sehingga dengan adanya pergantian atom Si dengan atom Al pada variasi rasio Si/Al menyebabkan energi minimum semakin besar. Jika dilihat pada histogram, rasio



Si/Al 3 dan 3,8 memiliki energi minimum tertinggi. Hal ini terjadi akibat dari penyebaran atau substitusi atom Al yang dilakukan secara acak di mana kesimetrisan dari struktur berkurang sehingga energi minimum struktur tersebut meningkat.



**Gambar 4** Pengukuran Diameter Rongga Rasio Si/Al 3,36 pada oksigen nomor 912 dan oksigen nomor 1212

Selanjutnya dilakukan pengukuran diameter rongga pada struktur zeolit RHO dengan semua variasi rasio Si/Al yang ada. Berdasarkan pengukuran diameter rongga menunjukkan diameter rongga terbesar terdapat pada rasio Si/Al 3,36 dengan jarak antara oksigen nomor 912 dan oksigen nomor 1212 sebesar 12,5602 Å. Diameter rongga terkecil pada rasio Si/Al 2,2 dengan jarak antara oksigen nomor 121 dan oksigen nomor 445 sebesar 7,4629 Å.

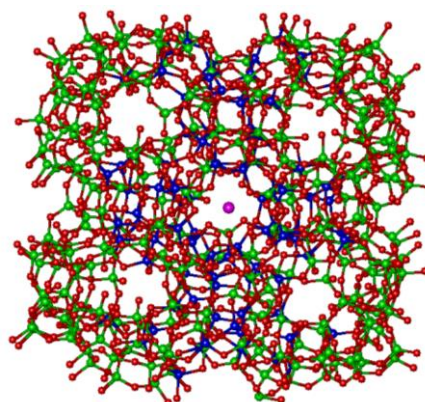
**Tabel 5** Panjang Ikatan Si-O, Panjang Ikatan Al-O dan Sudut Si-O-Al Dengan Variasi Rasio Si/Al Pada Diameter Rongga A

Rumus Struktur	Rasio Si/Al	Si-O (1068-1067) (Å)	Al-O (1066-1067) (Å)	Si-O-Al (1068-1067-1066) (°)
Si <sub>384</sub> O <sub>864</sub>	-	1,6405	1,6568	133,0320
Al <sub>64</sub> Si <sub>320</sub> O <sub>864</sub>	5	1,6537	1,8483	113,8830
Al <sub>72</sub> Si <sub>312</sub> O <sub>864</sub>	4,33	1,7033	1,8509	107,5710
Al <sub>80</sub> Si <sub>304</sub> O <sub>864</sub>	3,8	1,6876	1,8943	113,1500
Al <sub>88</sub> Si <sub>296</sub> O <sub>864</sub>	3,36	1,6673	1,8590	116,8750
Al <sub>96</sub> Si <sub>288</sub> O <sub>864</sub>	3	1,6604	1,8466	112,3500
Al <sub>104</sub> Si <sub>280</sub> O <sub>864</sub>	2,69	1,6608	1,8448	113,9590
Al <sub>112</sub> Si <sub>272</sub> O <sub>864</sub>	2,43	1,6464	1,8443	109,0790
Al <sub>120</sub> Si <sub>264</sub> O <sub>864</sub>	2,2	1,6465	1,8538	107,6080
Al <sub>128</sub> Si <sub>256</sub> O <sub>864</sub>	2	1,6534	1,8571	107,8410

Pengukuran panjang ikatan Si-O, panjang ikatan Al-O dan sudut Si-O-Al dari salah satu bagian diameter rongga di atas menunjukkan perubahan diameter rongga struktur zeolit RHO terjadi akibat adanya substitusi sejumlah atom Si dengan sejumlah atom Al yang menyebabkan adanya perubahan panjang ikatan Si-O, panjang ikatan Al-O, sudut Si-O-Si dan sudut Si-O-Al. Terjadi perubahan panjang ikatan antara Si-O dengan Al-O di mana rata-rata panjang ikatan Si-O adalah sekitar 1,6 Å sedangkan rata-rata

panjang ikatan Al-O adalah sekitar 1,8 Å. Hal ini menyebabkan substitusi atom Si dengan atom Al mengalami perpanjangan ikatan dan menyebabkan perubahan sudut serta diameter rongga dari struktur zeolit RHO.

### Hasil Variasi Kation Alkali Pada Pemodelan Struktur Zeolit RHO



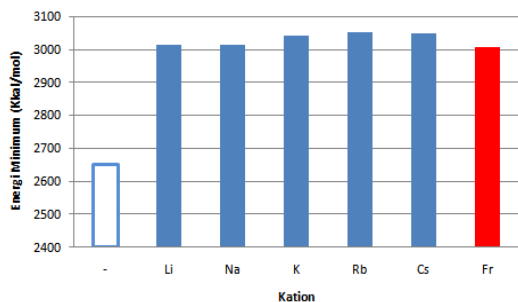
**Gambar 5** Struktur Zeolit RHO Rasio Si/Al 3,36 Dengan Kation

Keterangan: ● : Silika ● : Aluminium  
● : Oksigen ● : Kation

Berdasarkan visualisasi gambar penambahan kation alkali, penambahan kation dilakukan dengan meletakkan kation di bagian tengah rongga struktur zeolit RHO, namun saat dilakukan optimasi geometri kation mengalami pergeseran atau perubahan posisi. Penempatan kation pada struktur zeolit sangat mempengaruhi kestabilan struktur dan juga kapasitas penyerap terbaik pada zeolit tersebut. Penambahan kation sangat berpengaruh pada perubahan struktur di mana dapat terjadi deformasi selama berlangsungnya optimasi geometri. Sehingga dapat terjadi perpindahan atau pergeseran pada kation. Pergeseran atau perubahan posisi dari kation terjadi karena mencari posisi yang paling stabil dalam struktur zeolit [5].

**Tabel 6** Energi Minimum Struktur Zeolit RHO Rasio Si/Al 3,36 Variasi Kation Alkali

Rumus Struktur	Kation	Energi Minimum (Kkal/mol)	Selisih Energi Minimum (Kkal/mol)
Al <sub>88</sub> Si <sub>296</sub> O <sub>864</sub>	-	2652,0308	-
LiAl <sub>88</sub> Si <sub>296</sub> O <sub>864</sub>	Li <sup>+</sup>	3014,1453	362,114502
NaAl <sub>88</sub> Si <sub>296</sub> O <sub>864</sub>	Na <sup>+</sup>	3012,8652	360,834472
KAl <sub>88</sub> Si <sub>296</sub> O <sub>864</sub>	K <sup>+</sup>	3042,3911	390,360351
RbAl <sub>88</sub> Si <sub>296</sub> O <sub>864</sub>	Rb <sup>+</sup>	3050,1187	398,087890
CsAl <sub>88</sub> Si <sub>296</sub> O <sub>864</sub>	Cs <sup>+</sup>	3047,1035	395,072754
FrAl <sub>88</sub> Si <sub>296</sub> O <sub>864</sub>	Fr <sup>+</sup>	3006,6587	354,627929



**Gambar 6** Histogram Energi Minimum Struktur Zeolit RHO Rasio 3,36 Dengan Variasi Kation Alkali

Berdasarkan histogram di atas dapat diketahui urutan variasi kation alkali struktur zeolit RHO rasio Si/Al berdasarkan energi minimumnya. Energi minimum pada kation  $Rb^+ > Cs^+ > K^+ > Li^+ > Na^+ > Fr^+$ . Struktur zeolit RHO rasio Si/Al 3,36 dengan penambahan kation  $Fr^+$  merupakan struktur paling stabil karena memiliki energi minimum terendah dibandingkan dengan energi minimum kation lainnya.

Perubahan energi minimum yang terjadi pada penambahan kation alkali tidak dapat ditinjau berdasarkan jari-jari atau karakteristik setiap unsur alkali menurut susunan atau urutannya dalam sistem periodik. Karena pada penelitian yang dilakukan arah dan posisi setiap kation yang ditambahkan berbeda-beda. Perbedaan arah dan posisi setiap kation terjadi karena pengoptimasian geometri yang dilakukan pada setiap struktur yang ditambahkan kation. Perbedaan arah dan posisi kation pada struktur zeolit RHO menyebabkan perubahan energi yang berbeda dan tidak teratur pada hasil perhitungan energi minimum struktur dengan penambahan kation alkali.

**Tabel 7** Panjang Ikatan Si-O, Panjang Ikatan Al-O, Sudut Si-O-Al Dan Jarak Kation-Al Struktur Zeolit RHO Rasio Si/Al 3,36 Dengan Variasi Alkali Pada Diameter Rongga

Rumus Struktur	Kation	Si-O (1068-1067) (Å)	Al-O (1066-1067) (Å)	Si-O-Al (1068-1067-1066) (°)	Kation-Al (1066) (Å)
$Al_{88}Si_{296}O_{864}$	-	1,6673	1,8590	116,8750	-
$LiAl_{88}Si_{296}O_{864}$	$Li^+$	1,68584	1,84721	118,519	9,67129
$NaAl_{88}Si_{296}O_{864}$	$Na^+$	1,68630	1,84754	118,699	10,02520
$KAl_{88}Si_{296}O_{864}$	$K^+$	1,68575	1,84745	118,552	8,59920
$RbAl_{88}Si_{296}O_{864}$	$Rb^+$	1,68629	1,84751	118,620	8,45587
$CsAl_{88}Si_{296}O_{864}$	$Cs^+$	1,68598	1,84736	118,591	8,10232
$FrAl_{88}Si_{296}O_{864}$	$Fr^+$	1,68525	1,84707	118,739	7,80046

Pengukuran struktur zeolit RHO rasio Si/Al 3,36 dengan variasi kation alkali dilanjutkan dengan melakukan pengukuran diameter rongga.

Pengukuran menunjukkan diameter rongga terbesar terdapat pada penambahan kation  $Fr^+$  dengan jarak antara oksigen nomor 323 dan oksigen nomor 635 sebesar 12,6255 Å. Diameter rongga terkecil pada penambahan kation  $Cs^+$  dengan jarak antara oksigen nomor 121 dan oksigen nomor 445 sebesar 8,9286 Å.

Perbedaan penambahan kation juga mempengaruhi panjang ikatan Si-O, panjang ikatan Al-O dan sudut Si-O-Al. Namun perubahan yang terjadi tidak besar karena kation yang digunakan berasal dari golongan yang sama, yakni golongan alkali dengan perbedaan jari-jari yang tidak begitu jauh.

## KESIMPULAN

Dari hasil yang diperoleh dapat disimpulkan bahwa:

1. Perbandingan rasio Si/Al yang memiliki kestabilan terbaik pada struktur zeolit RHO adalah rasio Si/Al 3,36 karena memiliki energi minimum terendah dibandingkan dengan rasio Si/Al lain. Energi minimum rasio Si/Al 3,36 sebesar 2652,0308 Kkal/mol.
2. Kation alkali yang memiliki kestabilan terbaik pada struktur zeolit RHO adalah kation  $Fr^+$  dengan energi minimum 3006,6587 Kkal/mol.
3. Kation alkali yang memiliki pengaruh ukuran rongga terbesar dan terkecil pada struktur zeolit RHO adalah kation  $Fr^+$  dan kation  $Cs^+$ .

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Muhlisin, Z. M., Kasmui, Woro, S. 2008. *Kajian Pengaruh Variasi Rasio Si/Al dan Variasi Kation Terhadap Perubahan Ukuran Pori Zeolit Y Menggunakan Metode Mekanika Molekular*. Tugas Akhir S-1 Semarang: Universitas Negeri Semarang.
- [2] Sugiyanti, N., Kasmui, Subiyanto, H. S. 2008. *Perubahan Ukuran Rongga Pada Modifikasi Molekul Zeolit ZSM-5 Dengan Variasi Rasio Si/Al dan Variasi Kation Menggunakan Metode Mekanika Molekular*. Tugas Akhir S-1. Semarang: Universitas Negeri Semarang.
- [3] Endrias, H., Kasmui, Prasetya, A. T. 2013. *Pengaruh Rasio Si/Al, Kation dan Template Organik terhadap Ukuran Rongga Zeolit ZSM-5*. Vol 2 No. 1. Semarang: Universitas Negeri Semarang.
- [4] Saputra, R. 2005. *Pemanfaatan Zeolit Sintesis Sebagai Alternatif Pengolahan Limbah Industri*. Artikel 1 IV Halaman 18-20. Yogyakarta: Universitas Gajah Mada.

- [5] Kolezynski, A., Mikula, A., Krol, M. 2015.  
*Periodic Model Of LTA Framework  
Containing Various Non-Tetrahedral  
Cations*. Spectrochimica Acta Part A:  
Molecular and Biomolecular Spectroscopy.  
1386-1425. Elsevier B.V. Poland: AGH  
University Of Science And Technology.